نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد 8، شماره 1، نیمسال اول 1397، ص 169-159

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 1, Spring - Summer 2018, p. 159-169

مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از فضولات گاوی در هاضم اختلاط کامل با تغذیه نیمه‌پیوسته

جبرائیل تقی‌نژاد[1]*- رضا عبدی[2]- مهرداد عدل[3]

تاریخ دریافت: 1395/05/04
تاریخ پذیرش: 1395/09/01

چکیده

تأمین انرژی‌های جایگزین و تجدیدپذیر با هدف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و صیانت از منابع ملی از اولویت‌های اصلی اغلب کشورها ازجمله ایران است و در این میان تولید بیوگاز یکی از زمینه‌های دارای پتانسیل قابل‌ملاحظه به‌شمار می‌رود. در این پژوهش فرایند تولید بیوگاز در هاضم بی‌هوازی نیمه‌پیوسته در مقیاس پایلوت به حجم 180 لیتر و زمان ماند هیدرولیکی 25روز در شرایط دمای میان‌خواه (مزوفیلیک 35 ±2°C) با نرخ بارگذاری آلی (OLR)، ($m^{-3}.d^{-1}$). 2 kg VS و 3 با استفاده از فضولات گاوی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین نرخ روزانه تولید بیوگاز در بارگذاری 2 و ($m^{-3}.d^{-1}$). 3 kg VS به‌ترتیب 40 و 49 لیتر در روز بود. بازده تولید بیوگاز با افزایش نرخ بارگذاری کاهش داشته و برای نرخ بارگذاری آلی 2 و ($m^{-3}.d^{-1}$). 3 kg VS به‌ترتیب 0/243 و (m^3. kg^{-1} VS_{added}) 0/204 به‌دست آمد. بیشترین درصد متان در هر دو نرخ بارگذاری در محدوده تولید پایدار بیوگاز حدود 58 تا 62 درصد و میزان کاهش جامدات آلی ورودی در بارگذاری 2 و ($m^{-3}.d^{-1}$). 3 kg VS به‌ترتیب با 64/5 و 53 درصد بود. برای مدل‌سازی فرایند تولید بیوگاز از مدل‌های لجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده استفاده گردید. کیفیت برازش این مدل‌ها با داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و مقایسه ضریب تبیین (R^2) و ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطاها (RMSE) انجام گردید. نتایج نشان داد مدل‌های لجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده برای توجیه فرآیند تجمعی تولید بیوگاز در هاضم نیمه‌پیوسته با کمترین میانگین مجموع مربعات خطاها و ضریب تبیین بیش از 0/99 درصد بهترین کارایی را داشته است.

واژه‌های کلیدی: بیوگاز، راکتور اختلاط کامل، فضولات گاوی، مدل‌سازی، هضم بی‌هوازی

مقدمه

امروزه دستیابی به انرژی پاک و ارزان موردتوجه اکثر کشورها، به‌خصوص کشورهای درحال‌توسعه محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر مصرف جهانی انرژی به دلیل رشد جمعیت و توسعه صنعت در کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه به‌شدت افزایش‌یافته است. کاهش روزافزون منابع انرژی‌های فسیلی به‌همراه افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی به‌ویژه پدیده گلخانه‌ای و تغییر اقلیم جهانی در حال تبدیل‌شدن به یک بحران جهانی است (Sunarso *et al.*, 2012). ادامه این روند تهدیدی جدی برای کشورهای صادرکننده ازجمله کشور ما خواهد بود و نسل‌های آتی را با مشکل جدی تأمین انرژی مواجه خواهد ساخت. بیوگاز یکی از مهم‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر است که امکان تولید آن با استفاده از ضایعات دامی، کشاورزی، صنعتی و خانگی وجود دارد و دارای مزایای زیادی ازجمله حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست اطراف، سوخت تجدیدپذیر و فاقد سمیت است (Omer *et al.*, 2002). بنابراین لزوم استفاده گسترده از سوخت‌های جایگزین و پاک بایستی مدنظر پژوهشگران قرار گیرد. بیوگاز یک منبع انرژی ارزان‌قیمت، تجدیدپذیر و جایگزین مناسبی است که می‌تواند در مناطق روستایی به نحو مناسب تولید و استفاده گردد.

هضم بی‌هوازی یک فرآیند بیولوژیکی است که از تجزیه زیستی ضایعات توسط باکتری‌ها در شرایط فقدان یا کمی اکسیژن تولید بیوگاز می‌کند (Song, *et al*., 2012; Safari and Abdi, 2015). این گاز عمدتاً متشکل از متان و دی‌اکسید کربن است و تنها محتوی متان آن دارای پتانسیل استفاده به‌عنوان سوخت است (Themelis and Ulloa, 2007). همچنین بیوگاز حاصل شکستن پلیمرهای پیچیده قابل‌حل، توسط آنزیم‌های تولیدی باکتری‌های مخمری بوده که از تخمیر سوبسترا (نظیر ضایعات دامی و کشاورزی و صنعتی)، اسیدهای چرب زنجیر کوتاه، هیدروژن و دی‌اکسید کربن تولید می‌کند. به‌طورکلی هضم بی‌هوازی شامل چهار مرحله متوالی

1 و 2- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری مکانیزاسیون کشاورزی و دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
3- استادیار، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: J.Taghinazhad@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jam.v8i1.57758

هیدرولیز، اسیدسازی، استات‌سازی و درنهایت تولید متان است (Zhang *et al.*, 1999; Umar *et al.*, 2013). پارامترهای زیادی بر میزان تولید بیوگاز تأثیر دارند مانند دمای محیط تولید، pH، نسبت غلظت سوبسترا، نوع خوراک تغذیه، همزن، پیش‌تیمار اولیه، زمان‌ماند هیدرولیکی و نسبت کربن به ازت و نوع هاضم (پیوسته و غیرپیوسته) بر فرآیند هضم که به‌طور آهسته در مدت‌زمان 50-30 روز انجام می‌گیرد (Sreenivas *et al.*, 2010; Umar *et al.*, 2013). دعاگویی و غضنفری مقدم در پژوهشی به‌منظور بررسی میزان تولید بیوگاز از ضایعات میوه در ترکیب با فضولات گاوی با دو روش ناپیوسته و نیمه‌پیوسته نشان دادند که تزریق روزانه مواد آلی، موجب تولید حجم قابل‌توجهی از بیوگاز در مدت‌زمان طولانی گردید (Doagooei and Gazanfari Moghaddam, 2009). محققان زیادی بر روی واکنش سینتیک تولید بیوگاز و مدل‌های سینتیکی توسعه‌یافته در فرآیند هضم بی‌هوازی در سوبستراهای مختلف را بررسی و مدل‌های ریاضی مختلفی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش کرده‌اند که در بهینه‌سازی و مدیریت این فرایند نقش عمده‌ای دارد. در تحقیقی ژو و همکاران، در فرآیند تولید بیوگاز از باگاس چغندرقند و زباله‌های سلولزی، از مدل تغییریافته گومپرتز استفاده کردند و این مدل برازش خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشته است (Zhu *et al.*, 2009). همچنین محققین بررسی‌های زیادی در زمینه تولید بیوگاز از موز و ترکیب با ضایعات موز انجام دادند ولی مدلی برای سینتیک تولید بیوگاز ارائه ندادند (Ghatak and Mahanta, 2014). در تحقیقی دیگر معمری و عمرانی (2014) به‌منظور تولید بیوگاز از لجن ضایعات فعال و ترکیب فضولات گاوی به‌عنوان ماده تلقیح، معادله اصلاح‌شده مناسب برای تولید بیوگاز برآورد کردند. معادله ارائه‌شده ارتباط بین ماکزیمم بیوگاز تولیدی و پتانسیل تولیدی را با ضریب رگرسیون 0/996 به‌طور مطلوبی بیان نمود (Maamri and Amrani, 2014). همچنین در تحقیقی با هدف بهینه‌سازی و افزایش تجزیه‌پذیری ضایعات برای مدل‌سازی هضم بی‌هوازی مواد آلی ضایعات جامد شهری، چندین مدل ریاضی (مدل گومپرتز، تابع لجستیک، معادله گاسیان و اولین مدل توصیه‌شده) مقایسه گردید. نتایج نشان داد مدل‌های گومپرتز و اولین مدل توصیه‌شده در بیشتر تیمارها به‌منظور بهره‌وری بالای تولید متان بهترین برازش را داشته است (Nielfa, *et al.*, 2015). همچنین در مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از ترکیب فضولات گاوی با پوست درخت در شرایط آزمایشگاهی تحت دمای مزوفیلیک با استفاده از راکتور ناپیوسته گزارش دادند مدل‌های لجستیک و گومپرتز بهترین ضریب همبستگی را نسبت به تابع‌نمایی داشته است و تیمار ترکیبی باعث افزایش 18% تولید بیوگاز گردید (Latinwo and Agarry, 2015). هدف از این پژوهش طراحی و ساخت هاضم بی‌هوازی اختلاط کامل با تغذیه نیمه‌پیوسته در مقیاس پایلوت و مدل‌سازی فرآیند تولید بیوگاز از فضولات گاوی در دمای مزوفیلیک با استفاده از مدل‌های متداول نظیر تابع‌نمایی ماکزیمم، لجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق برای تولید بیوگاز از فرآیند هضم بی‌هوازی نیمه‌پیوسته در شرایط تحقیقاتی پایلوت، در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل با عرض جغرافیایی "39 °39 و طول جغرافیایی "88 °48 اجرا شد.

جدول 1- خصوصیات اولیه لجن تلقیح و فضولات گاوی مورداستفاده در هاضم

Table 1- Characteristics of cattle manure and seed sludge used in the experiments.

پارامترها/ مواد مورداستفاده Parameters/substrate	کود گاوی Cow manure	لجن تلقیح Inoculum
میزان مواد جامد کل (TS%)	16.21 (%FM)	7.11 (%FM)
میزان مواد جامد فرار (VS%)	13.48 (%FM)	5.50 (%TS)
(%) $VS.TS^{-1}$	83.41	77.38
pH	7.49	7.08
کربن کل (C%)	32.40 (%TS)	37.15 (%TS)
نیتروژن کل (N %)	1.98 (%TS)	1.74 (%TS)
(%) C/N	16.36	21.35

FM: ماده خام ورودی به هاضم (Fresh matter)، TS: مواد جامد کل (Total solids) و VS: مواد جامد فرار (Volatile solids)

تهیه و آنالیز لجن تلقیح و فضولات گاوی

برای شروع کار قبل از انجام آزمایش، لجن تلقیح موردنیاز از خروجی هاضم به‌کارگیری شده در پژوهشگاه مواد و انرژی کرج استفاده گردید. این لجن که دارای مواد غنی از باکتری و حاوی مقادیر زیادی باکتری‌های تولیدکننده بیوگاز است به راکتور اضافه گردید تا فرآیند تولید بیوگاز سریع‌تر شروع گردد. فضولات گاوی تازه

مورداستفاده به‌صورت هفتگی از مجتمع گـاوداری کشـت و صـنعت دامپروری مغان تهیه‌شده، سپس خصوصیات اولیـه آن قبـل از انجـام آزمایش از لحاظ محتوی ماده آلی، نیتروژن کل، کربن کل، ماده جامد کل، ماده جامد فرار، میزان pH، EC و نسبت کربن بـه ازت تعیـین شد. تا مخلوطی مناسب از مواد اولیه در هاضم حاصـل شـود. میـزان مـواد جامـد کـل براسـاس اسـتاندارد ملـی ایـران شـماره 2-20822 (استاندارد ملی ایـران 2-20822، 2016) و سـایر پارامترهـا براسـاس استاندارد شماره APHA 1015 تعیین گردیده‌انـد (APHA, 1998)، برخی خصوصیات لجن تلقیح و فضـولات گـاوی در جـدول 1 آورده شده است.

مشخصات طراحی و ساخت هاضم

راکتور بی‌هوازی نیمه‌پیوسته تـک‌مرحلـه‌ای در مقیـاس پـایلوت طراحی و ساخته شد. شماتیک هاضم در شکل شماره 1 نمـایش داده شده است. از لحاظ شکل هندسی استوانه‌ای و جنس آن آهن گالوانیزه 4 میلی‌متر با قطر 46 سانتی‌متر و ارتفاع 110 سانتی‌متـر کـه دارای 180 لیتر حجـم بـود. دو شـیر کنتـرل حجـم ورودی در ارتفـاع 30 سانتی‌متری در بالای مخزن و دو شیر خروجی در کف برای خروج و نمونه‌برداری از مواد موجود در هاضم استفاده شده است.



شکل 1- شماتیک هاضم نیمه‌پیوسته

Fig. 1. Set up of semi continues digester

ارزیابی سیستم هضم

به‌منظور ارزیابی فرایند هضم از هاضم بی‌هوازی نیمه‌پیوسـته در مقیاس پایلوت در شرایط دمای میان‌خـواه (مزوفیلیـک 2°C± 35) از فضولات گاوی براساس مواد جامد فرار (VS) و زمان‌ماند هیدرولیکی 25روز به‌ترتیب با دو نرخ بارگذاری ($m^{-3}.d^{-1}$). 2 kg VS و 3 استفاده شد. در شروع کار هاضم مقدار 60 کیلوگرم لجـن تلقـیح از خروجـی سیستم بیوگاز به‌کارگیری شده در پژوهشگاه مواد و انرژی کرج تهیه و به مدت یک هفته میزان بیوگاز خروجی تخلیه گردید. سپس خوراک تغذیه فضولات گاوی تازه به حجم 80 لیتر با نرخ بارگذاری (kg VS $m^{-3}.d^{-1}$). 2 اضافه گردید تا حجم به‌کارگیری هاضم بـه حجـم 140 لیتر رسید. سپس آزمایش در دو فاز به مدت 84 روز با تخلیه و تغذیه روزانه 5/6 لیتر انجام گردید.

پارامترها و روش اندازه‌گیری

میزان بیوگاز خروجی راکتور با اسـتفاده از روش جابـه‌جـایی آب اندازه‌گیری شده و به‌صورت هفتگی جمع‌آوری، سپس با تزریق نمونه به دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC-MS)، نتایج از طریـق قسـمت جمع‌آوری اطلاعات ثبت و توسط نرم‌افزارPEAK درصد دو گاز متان و دی‌اکسید کربن تعیین گردید. برای تعیین درصد رطوبت و مواد جامد کل (TS) نمونه‌های مواد خام با جرم 100 تا 150 گرم پس از توزین روی سینی مناسب به مدت لازم در گرم‌خانه (آون خشک‌کننده) تحت دمای 2°C± 105 تا رسیدن به جرم ثابت (زمانی که پـس از حـداقل 60 دقیقه حرارت دهی میزان کاهش جرم کمتر از 0/2٪ جـرم اولیـه باشد) خشک شدند سپس از رابطه (1) محاسبه گردید (استاندارد ملـی ایران 2-20822، 2016).

$$TS = \left(\frac{C-A}{B-A}\right)\times 100 \quad (1)$$

که در آن A وزن ظرف خالی (gr)، B وزن ظرف+ نمونه‌تر (gr) و C وزن ظرف+ نمونه خشک (gr) است.

برای تعیین کل مواد جامد فرار (VS)، از نمونه خشک‌شده مرحله قبل مقادیر کوچکی حدود (5 -3 گرم) در بوته چینی مخصوص درون کـوره الکتریکـی قـرار گرفتنـد، سـپس طبـق روش قیـد شـده در

استاندارد دمای کوره به 570 ± 25 °C رسانده شد و برای مدت یک ساعت در این دما سوزانده شد. سپس درصد مواد فرار جامد (VS) از رابطه (2) محاسبه شد (APHA, 1998).

$$VS=\left(\frac{F-G}{F-E}\right)\times 100 \quad (2)$$

که در آن E وزن خالی بوته مخصوص ذوب (gr)، F وزن بوته مخصوص+ نمونه خشک (gr) و G وزن بوته مخصوص+ نمونه خاکستر (gr) است

مدل‌سازی فرآیند هضم بی‌هوازی

به‌منظور بهینه کردن و مدل‌سازی فرایند تولید بیوگاز، پارامترهای نظیر بیشترین نرخ تولید تجمعی بیوگاز و زمان پیشرفت روزانه فرآیند هضم از طریق اجرای پایلوت تحقیقاتی هاضم نیمه‌پیوسته به‌دست آمد. کیفیت برازش این مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و مقایسه ضریب تبیین (R^2) و ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطاها (RMSE) انجام گردید. روابط مربوط به مدل‌ها در جدول 2 ذکر شده‌اند (Lo *et al*., 2010; Zwieterring *et al*., 1990).

جدول 2- معادلات سینتیکی مورداستفاده برای برازش و مدل‌سازی فرآیند هضم بی‌هوازی

Table 2- Kinetic equations used for modeling and fitting in anaerobic digestion posses

مدل‌های سینتیکی Kinetics models	معادله تغییر شکل یافته Modified equations
لجستیک تغییر شکل یافته (Modified Logistic)	$Y=P\{1-\exp[4r_mP^{-1}(\lambda-t)+2]\}$
تابع‌نمایی ماکزیمم (Exponential Rise to Maximum)	$Y=P(1-\exp(-kt))$
گومپرتز اصلاح‌شده (Modified Gompertz)	$Y=P\exp\{-\exp[r_mP^{-1}e(\lambda-t)+1]\}$

در مدل‌های ذکرشده در جدول 2 متغیرها و پارامترها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند Y: میزان تولید تجمعی بیوگاز در زمان t برحسب $(l.(kg\ VS)^{-1})$، P: پتانسیل تولید تجمعی $(l.(kg\ VS)^{-1})$، r_m: بیشترین نرخ بیوگاز تولیدی روزانه $(l.(kg\ VS.day)^{-1})$، λ: مدت‌زمان تأخیر تا شروع فرآیند تولید بیوگاز (روز)، t: زمان پیشرفت فرآیند هضم (روز) و a، b و k: ثابت‌های به‌دست‌آمده از معادلات سینتیک فرآیند هضم است.

نتایج و بحث

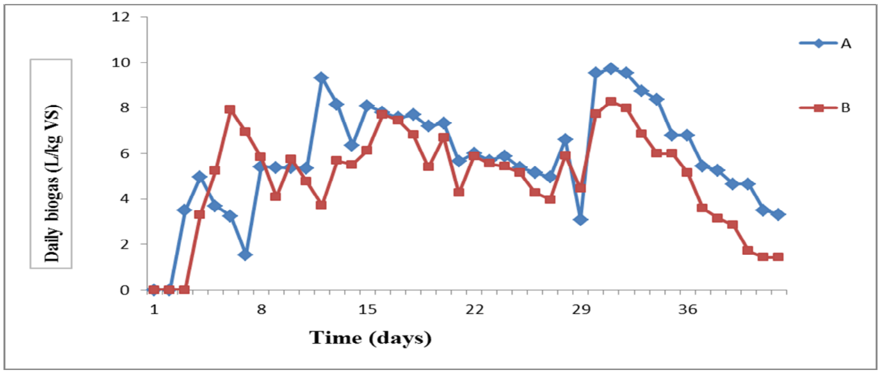
اثر نرخ بارگذاری آلی بر تولید بیوگاز

روند تغییرات روزانه تولید بیوگاز در شرایط دمای میان‌خواه (مزوفیلیک 35 ± 2°C) در هاضم نیمه‌پیوسته پایلوت با دو نرخ بارگذاری آلی متفاوت از فضولات دامی در شکل 2 نشان داده شده است. مرحله اول بارگذاری با $2\ kg\ VS.(m^{-3}.d^{-1})$ شروع گردید. روزهای اول احتمالاً به دلیل ترکیب لجن بی‌هوازی با فضولات دامی و عدم سازگاری میکروارگانیسم‌ها با خوراک اصلی، میزان بیوگاز تولیدی بسیار پایین است سپس به‌تدریج روند صعودی پیدا کرد. به‌طوری‌که در اواسط بارگذاری اول سطح بهینه تولید بیوگاز حاصل گردید. این نتایج با نتایج اکثر محققان هم‌خوانی دارد (Safari and Abdi, 2015; Adebayo *et al*., 2015). برای تداوم پایداری تولید بعد از اتمام زمان اقامت 25 روز به مدت 15 روز سیستم بدون بارگذاری ادامه یافت.

از روز چهلم نرخ بارگذاری دوم با $3\ kg\ VS.(m^{-3}.d^{-1})$ با 5/6 لیتر در روز تغذیه و تخلیه مجدد ادامه یافت. نتایج نشان می‌دهد (شکل 2) حالت پایداری تولید بیوگاز برای نرخ بارگذاری اول در فاصله روزهای 35-20 به میزان حدود 40 لیتر در روز و برای بارگذاری دوم در فاصله روزهای 75-60 به میزان حدود 49 لیتر در روز بوده است. به‌بیان‌دیگر با افزایش نرخ بارگذاری میزان بیوگاز روزانه افزایش‌یافته ولی بازده تولیدی آن کاهش داشته است. این کاهش احتمالاً به دلیل تجمع اسیدهای چرب و درنتیجه کاهش pH به زیر 6/8 بوده است بنابراین با توجه به این‌که باکتری‌های متان‌ساز نسبت به کاهش pH بسیار حساس هستند محیط اسیدی شده و فعالیت باکتری‌های اسیدساز بیشتر از باکتری‌های متان‌ساز است. چنانچه انباشته شدن اسید چرب فرار در مرحله اول فرآیند هضم تسریع گردیده و میزان pH به حدود 7 کاهش یابد باعث کنترل مرحله متان‌سازی خواهد شد (Tait *et al*., 2009). یافته‌های این تحقیق با نتایج محققین در هاضم نیمه‌پیوسته همخوانی دارد (Adebayo *et al*., 2015).

در جدول 3 درصد ماده آلی فرار موجود قبل و بعد از فرآیند تولید بیوگاز در هر دو نرخ بارگذاری نشان داده شده است. مقایسه کاهش درصدهای ماده آلی فرار نشان می‌دهد که بارگذاری اول با نرخ $2\ kg\ VS.(m^{-3}.d^{-1})$ با درصد کود کمتر به‌واسطه تغذیه مناسب باکتری‌های فعال از مواد آلی ترکیبات درون هضم‌کننده دارای بیشترین درصد حذف ماده آلی فرار در حدود 64/5 درصد و همچنین

در بارگذاری دوم با 3 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$) کمترین درصد کاهش ماده آلی فرار حدود 53 درصد بوده است. بنابراین هرچه میزان ماده آلی فرار کاهش بیشتری پیدا کند حجم ویژه بیوگاز و متان تولیدی افزایش می‌یابد. این میزان کاهش ماده آلی فرار با نتایج تحقیقات کاستیلو و همکاران مطابقت دارد (Castillo *et al.*, 2006). بابایی و شایگان نیز در بررسی اثر نرخ بارگذاری آلی بر تولید متان از ضایعات سبزی‌ها نیز نتایج مشابهی گزارش نمودند (Babaee and Shayegan, 2011).



شکل 2- روند تولید روزانه بیوگاز از فضولات گاوی با دو نرخ بارگذاری آلی

Fig. 2. Trend of daily biogas production from cow manure with two organic loading rates

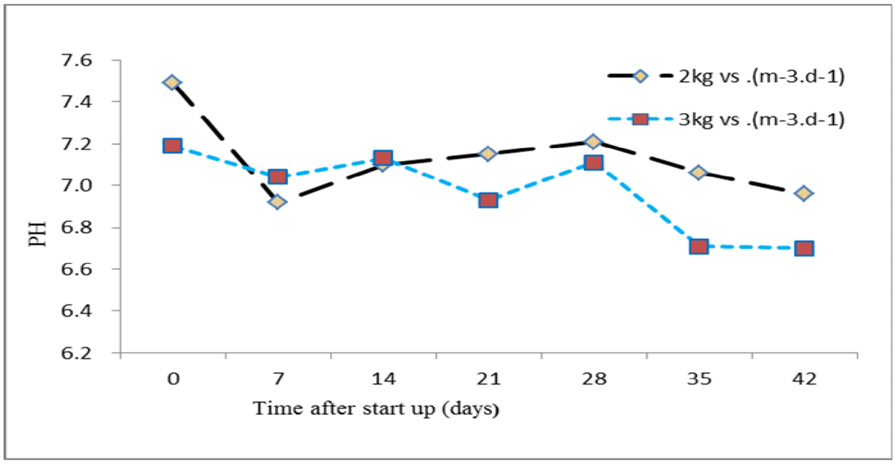
جدول 3- میزان ماده آلی فرار قبل و پس از پایان بارگذاری با نرخ‌های متفاوت

Table 3- Organic matter content of pervious and end the experiment in different organic loading rate

نرخ بارگذاری آلی Organic loading rate	قبل از شروع آزمایش (روز اول) Before experiment (1 day)	پایان بارگذاری (روز 28) End of loading (28 day)	پایان آزمایش (روز 42) End experiment (42 day)
	درصد ماده آلی فرار (Percent of organic loading rate)		
2 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$)	82.80	59.15	29.54
3 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$)	83.64	63.54	39.20

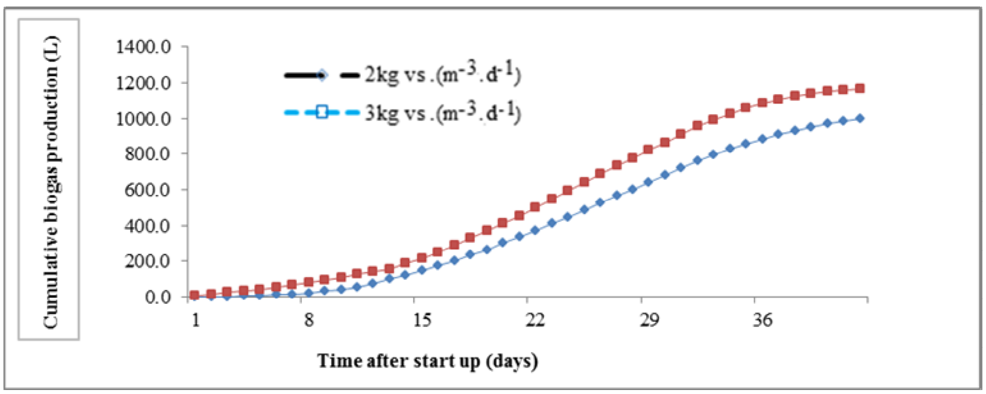
همچنین روند تغییرات pH در هر دو بارگذاری نشان می‌دهد که pH اولیه در هفته اول در هر دو بارگذاری کاهشی بوده و همین امر منجر به کاهش تولید بیوگاز شده است (شکل 3). که دلیل آن می‌تواند به حساسیت بالای باکتری‌های متان‌ساز نسبت به pH بوده و در pH کمتر از 6/2 فعالیت آنزیمی قابل قبولی ندارند. ولی باکتری‌های اسیدساز در pH بالاتر از 5 فعالیت آنزیمی مناسبی دارند بنابراین pH محیط تأثیر عمده‌ای در تکثیر و فعالیت باکتری‌های هضم‌کننده داشته و چنانچه میزان pH محیط به کمتر از 5/5 برسد این باکتری غیرفعال می‌گردد که اکثر باکتری‌های بی‌هوازی و ازجمله متان‌ساز در pH بین 6/4-7/2 به‌خوبی فعالیت می‌کنند (Alavarez and Lide, 2008; Sharma, 2002).

شکل 4 روند تولید تجمعی بیوگاز به‌صورت تابعی از زمان در هر دو نرخ بارگذاری آلی را نشان می‌دهد. تولید این گاز پس از گذشت 2 تا 3 روز آغاز و در روزهای میانی زمان‌ماند هیدرولیکی به نقطه اوج خود می‌رسد. سپس بعد از چند روز از قطع بارگذاری یک روند نزولی پیدا می‌کند. زمان رسیدن به نقطه اوج کاملاً تحت تأثیر درصد کود دامی تازه قرار داشت. درصد متان موجود در گاز تولیدی در روزهای اوج حدود 58 تا 62 درصد بود. درمجموع می‌توان نتیجه گرفت که پتانسیل تولید بیوگاز در هر دو نرخ بارگذاری نزدیک به هم بوده و افزایش مقدار کود دامی تنها زمان رسیدن به این پتانسیل را کاهش می‌داد. همان‌طوری که از شکل 4 مشخص است در بارگذاری دوم به دلیل مقادیر بیشتر کود دامی تولید بیوگاز به‌خصوص در روزهای اول روند بیشتری دارد. این امر می‌تواند بیانگر وجود نقش تسریع‌کننده و شتاب‌دهنده در تولید باشد که هرچه مقدار کود بیشتری مورداستفاده قرار گیرد تسریع در رسیدن به نقطه اوج روزانه بیشتر مشهود می‌گردد. همچنین بازده تولید پس از چهل روز در هر دو نرخ بارگذاری آلی 2 kg vs. ($m^{-3}.d^{-1}$) و3 به‌ترتیب 0/243 m^{-3} و 0/204 به ازای هر کیلوگرم مواد آلی فرار از بین رفته (m^3. kg^{-1} VS) بود.



شکل 3- تغییرات pH در نرخ‌های بارگذاری آلی 2 و 3 کیلوگرم مواد آلی فرار بر مترمکعب از فضولات گاوی

Fig. 3. Profile of pH by organic loading rate 2 and 3 kg VS .($m^{-3}.d^{-1}$) from cow manure



شکل 4- تولید تجمعی بیوگاز در هر دو نرخ بارگذاری آلی

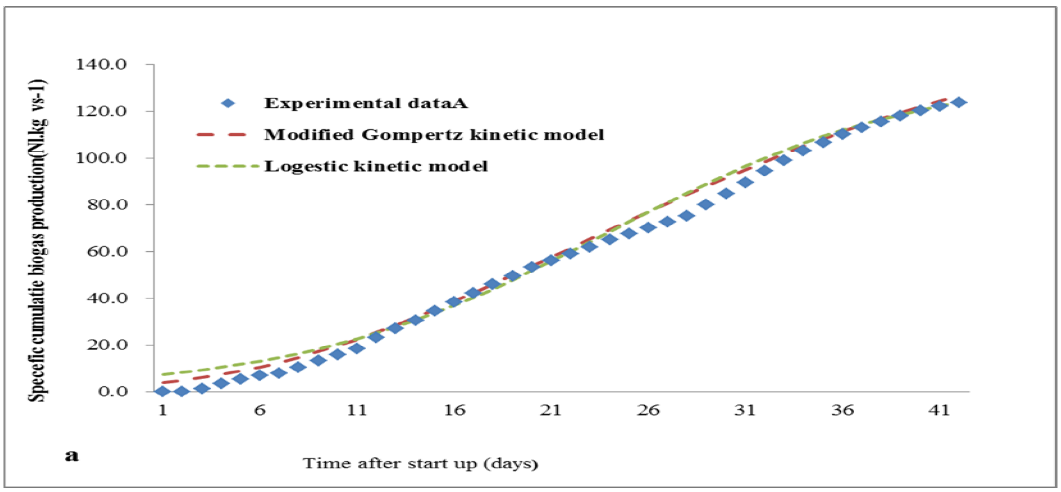
Fig. 4. Cumulative biogas production with tow organic loading rate

نتایج این بررسی نشان می‌دهد بازده تولید بیوگاز در مرحله اول با 2 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$) حدود 16 درصد بیشتر از مرحله دوم بارگذاری آلی بوده است. تولید تجمعی بیوگاز حدود یک هفته پس از قطع بارگذاری توأم با میزان pH شروع به کاهش نموده و مشاهده می‌گردد که pH از مهم‌ترین فاکتورهای دخیل در هضم بی‌هوازی بوده و در تخمیر مواد هضم‌شونده بسیار مؤثر است (Rabah *et al*., 2010).
همچنین pHهای متفاوت در طول فرآیند هضم ممکن است به دلیل مواد جامد فرار بالای موجود در فضولات گاوی نظیر پروتئین، چربی و غیره باشد که سبب تولید بیشتری از اسیدهای چرب فرار و سایر اسیدهای متابولیکی شده و درنتیجه باکتری‌های متان‌ساز تولید بیومتان می‌کنند (Iyagba *et al.*, 2009). این نتایج با یافته‌های سایر محققان مطابقت دارد (Linke, 2006; Adebayo *et al.*, 2015).

مدل‌سازی ریاضی فرآیند هضم

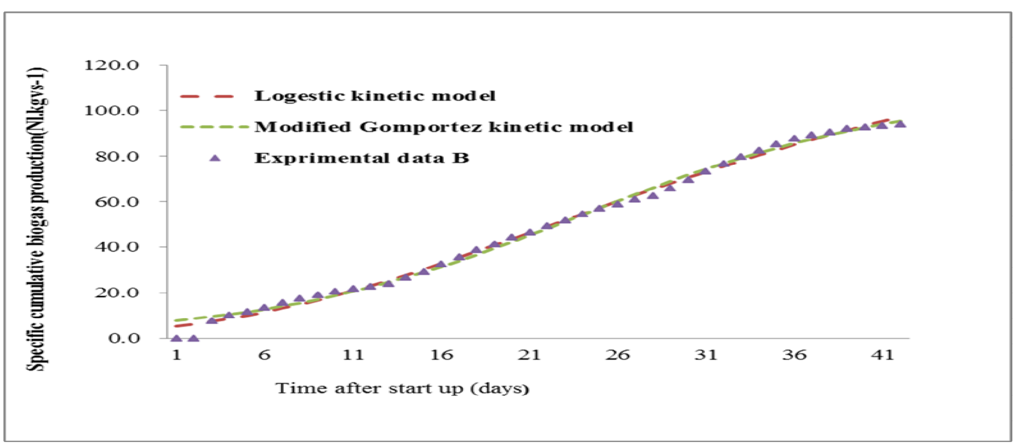
شکل‌های (5 و 6) برازش دو مدل لجستیک و گومپرتز تغییر شکل یافته با داده‌های به‌دست‌آمده در تولید تجمعی ویژه بیوگاز در هر دو بارگذاری آلی را نشان می‌دهد که تا هفته اول مدل‌ها به‌خوبی بر داده‌ها انطباق ندارند این امر به دلیل تولید گاز دی‌اکسید در روزهای اول بارگذاری است که وضعیت غیر متعادلی در درون هاضم به وجود آورده و بعد از حدود یک هفته به حالت عادی برمی‌گردد. بررسی ضریب تبیین (R^2) مدل‌ها نشان می‌دهد مدل‌های لجستیک و گومپرتز با بیشترین ضریب همبستگی که برای نرخ بارگذاری اول 2 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$) به‌ترتیب با 0/990 و 0/9960 و برای نرخ بارگذاری دوم 3 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$) به‌ترتیب با 0/9895 و 0/9941، بهترین برازش را نسبت به تابع‌نمایی ماکزیمم داشته است. پارامترهای هر مدل که توسط نرم‌افزار MATLAB تخمین زده‌شده‌اند در جدول 4 ذکرشده‌اند. مقادیر پارامتر (P) در مدل با مقادیر (Y) که برای مدت

42 روز برای هر دو نرخ بارگذاری محاسبه‌شده‌اند بسیار نزدیک است. زمان تأخیر فرآیند تولید بیوگاز هم با افزایش نرخ بارگذاری کاهش می‌یابد. بررسی دقیق‌تر زمان تأخیر (λ) در هر دو مدل نشان می‌دهد که مقادیر به‌دست‌آمده توسط مدل‌های گومپرتز و لجستیک به مقادیر پایلوت تحقیقاتی نزدیک‌تر هستند. همچنین بیشترین نرخ تولید بیوگاز روزانه (r_m) به‌صورت تقریباً یکسانی توسط هر دو مدل تخمین زده‌شده‌اند. بررسی داده‌های آزمایشی مربوط به این پارامتر نشان می‌دهد با افزایش نرخ بارگذاری یا درصد مواد جامد آلی فرار فضولات دامی مقدار این پارامتر کاهش می‌یابد. این امر به‌خوبی در مقایسه بیشترین نرخ تولید روزانه بیوگاز با بارگذاری 3 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$) با درصد کود بالا نسبت به بارگذاری دوم با نرخ 2 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$) با درصد کود کمتر مشهود است. برای بررسی بیشتر انطباق مدل‌ها با داده‌های آزمایشی پایلوت تحقیقاتی علاوه بر مقادیر ضریب تبیین (R^2)، ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطاها (RMSE) برای هر دو مدل محاسبه گردید (جدول 4). مقایسه مقادیر ریشه دوم میانگین مجموع مربعات خطاها و ضرایب تبیین مدل‌ها که برای هر دو نرخ بارگذاری بیش از 99 درصد است نشان می‌دهد مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌ها با داده تحقیقاتی پایلوت در سطح بالایی مطابقت دارند. نتایج بیانگر این است که دو مدل گومپرتز و لجستیک تغییر شکل یافته در راکتور نیمه‌پیوسته بهترین برازش را داشته و به‌خوبی توانایی تخمین و پیش‌بینی پتانسیل تولید بیوگاز را دارد.



شکل 5- چگونگی انطباق دو مدل لجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده در نرخ بارگذاری آلی 2 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$)

Fig. 5. Kinetic models of modified Gompertz and logistic fitted with organic loading rate 2 kg VS .(m^{-3}.d-^{1})



شکل 6- چگونگی انطباق دو مدل لجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده در نرخ بارگذاری آلی 3 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$)

Fig. 6. Kinetic models of modified Gompertz and logistic fitted with organic loading rate 3 kg VS.(m^{-3}.d-^{1})

جدول 4- مقایسه ضرایب و پارامترهای تخمین زده‌شده توسط مدل‌های سینتیکی فرآیند تولید بیوگاز

Table 4- Comparison of coefficient and parameters estimated kinetics models of biogas production posses

مدل‌های سینتیکی **Kinetics models**	**ضرایب و پارامترها** **Coefficient and parameters**	**2** **kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$)**	**3** **kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$)**
لجستیک تغییر شکل یافته (Modified Logistic)	R^2	0.990	0.9895
	RMSE	6.120	6.912
	P(Nl..(kg VS)$^{-1}$	263.1	223.2
	r_m (Nl .(kg VS.day)$^{-1}$	8.271	6.664
	λ (day)	8.354	5.72
گومپرتز اصلاح‌شده (Modified Gompertz)	R^2	0.9960	0.9941
	RMSE	5.141	5.150
	P(Nl .(kg VS)$^{-1}$	319.9	266.1
	r_m (Nl .(kg VS.day)$^{-1}$	7.62	6.185
	λ (day)	6.696	4.085

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعه هاضم نیمه‌پیوسته در مقیاس پایلوت با حجم به‌کارگیری 140 لیتر از فضولات گاوی نشان می‌دهد بیشترین نرخ روزانه تولید بیوگاز با 40 و 49 لیتر به‌ترتیب با نرخ بارگذاری آلی 2 و 3kg VS .($m^{-3}.d^{-1}$) بود. با افزایش نرخ بارگذاری بازده تولید بیوگاز کاهش داشته و برای نرخ بارگذاری آلی (OLR) 2 و 3 به‌ترتیب 0/243 و 0/204 m^3.(kg VS add)$^{-1}$ به‌دست آمد. میزان کاهش جامدات آلی ورودی در بارگذاری آلی ($m^{-3}.d^{-1}$). kg VS 2 و 3 به‌ترتیب با 64/5٪ و 53٪ و بیشترین درصد متان در هر دو نرخ بارگذاری در محدوده تولید پایدار بیوگاز حدود 58 تا 62 درصد بود. نتایج مدل سینتیکی نشان داد مدل‌های لجستیک و گومپرتز اصلاح‌شده برای توجیه فرآیند تجمعی تولید بیوگاز در هاضم نیمه‌پیوسته بهترین کارایی را داشته است.

References

1. Adebayo1, A. O., S. O. Jekayinfa, and B. Linke. 2015. Effects of Organic Loading Rate on Biogas Yield in a Continuously Stirred Tank Reactor Experiment at Mesophilic Temperature. British Journal of Applied Science & Technology 11 (4): 1-9.
2. Alavarez, R., and G. Liden. 2008. Simi continues co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure and fruit and vegetable waste. Renewable energy 33: 726-734.
3. APHA. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. and later revisions, American public health association, 1015 15thStreet NW, Washington, DC 20005. 1-35: Section 1090 (Safety).
4. Babaee, A., and J. Shayegan. 2011. Effect of organic loading rates (OLR) on production of methane from anaerobic digestion of vegetables waste. Bio Technology 8-13 may 411-417.
5. Castillo M. E. F., D. E. Cristancho, and V. A. Arellano. 2006. Study the operational condition for anaerobic digestion of urban solid waste, Waste management 26: 546-556.
6. Doagooei, A., and A. Ghazanfari Moghaddam. 2009. Assessment of biogas production continues and batch from fruit and vegetable wastes with cow manure. National Con. 5th agri. machinery. Mashhad Ferdowsi.
7. Ghatak, M. D., and P. Mahanta. 2014. Comparison of kinetic models for biogas production rate from saw dust. International Journal of Res. in Engineering and Technology 03 (07): 248-254.
8. INSO. 2015. Iranian National Standardization Organization. 20822-2 1st.Edition 2016. (In Farsi).
9. Iyagba, E. I., I. A. Mangibo, and Y. S. Mohammad. 2009. The study of cow dung as co-substrate with rice husk in biogas production. Scientific Research Essays 4 (9): 861-868.
10. Kaparaju, P., L. Ellegaard, and I. Angelidaki. 2008. Optimization of biogas production from manure through serial digestion- Lab-scale and pilot-scale studies. Bio Res. Tec. 100: 701-709.
11. Kumar, S., A. N., S. A. Mondal, S. Gaikward, and R. N. Devotta Singh. 2004. Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. Atmos. Environ. 38: 4921-4929.

12. Latinwo, G. K., and S. E. Agarry. 2015. Modeling the kinetics of biogas from mesophilic anaerobic co-digestion of cow dung with plantain peels. Int. Journal of Renewable Energy Development 4 (1): 55-63.
13. Li, Y., R. Zhang, Y. He., Ch. Zhang, X. Liu, Ch. Chen, and G. Liu. 2014. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn Stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR). Bio. Tech. 156: 342-347.
14. Linke, B. 2006. Kinetic study of thermophilic anaerobic digestion of solid wastes from potato processing. Biomass and Bioenergy 30: 892-896.
15. Lo, H. M., T. A. Kurniawan, M. E. T. Sillanpaa, Y. Y. Pai, and C. F. Chiang. 2010. Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors. Bio resources Technology 101: 6329-6335.
16. Maamri, S., and M. Amrani. 2014. Biogas Production from Waste Activated Sludge Using Cattle Dung Inoculums- Effect of Total Solid Contents and Kinetics Study. Ene. Procedia. 50:352-359.
17. Nielfa, A. R., M. Cano, E.Vinto Fernandez, and M. Fdz-Polanco. 2015. Anaerobic-digestion-modeling-of-the-main-components-of-organic-fraction-of-municipal-solid-waste. Process safety and Environmental Protection 94: 180-187.
18. Omer, T. O., and M. O. Fedalla. 2002. Engineering design and Economic Evaluation of a family sized biogas project in Nigeria. Tec novation.
19. Safari, M., and R. Abdi. 2016. Comparison biogas production from co digestion Canola and Wheat with cow manure. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 476-487. (In Farsi).
20. Sharma, D. 2002. Studies on availability and utilization of onion storage waste in a rural habitat. Ph.D. dissertation. Indian Institute of Technology. Delhi.
21. Song Z, G., Y. Yang Guo, and T. Zhang. 2012. Comparison of tow chemical pretreatments of rice straw for biogas production by anaerobic digestion. Bio Resources 7: 3223-3236.
22. Sreenivas, R., A. Retter, and P. J. Hobbs. 2010. Effect of Biomass Hydrolysis on Biogas production. Process Biochemistry 28 (2): 119-123.
23. Sunarso, O., S. J. Widiasa, and I. N. Budiyono. 2012. The Effect of Feed to Inoculums Ratio on Biogas Production Rate from Cattle Manure Using Rumen Fluid as Inoculums. Inter. J. Waste Resour. 2 (1): 1-4.
24. Tait, S., J. Tamis, B. Edgerteon, and D. J. Batstone. 2009. Anaerobic digestion of spend bedding from deep litter piggery housing. Bio resource Technol. 100: 2210.
25. Themelis, N. J., and P. A. Ulloa. 2007. Methane generation in landfills. Renew. Energ. 32 (7): 1243-1257.
26. Umar, H. S., B. R. Firdausi, R. W. A. Sharifah, and M. Fadimtu. 2013. Biogas production through Co-digestion of palm oil mill effluent with cow manure. Nigerian J.of Basic and Applied Science 21 (1): 79-84.
27. Waezi-zade, M., A. Ghazanfari Moghaddam, and S. Noorbakhsh. 2010. Finite element analysis and modeling water absorption by date pits during a soaking process journal of Zhejiang university –science (Biomedical and Biotechology) 11 (7): 482-488.
28. Xie, S., Z. Zhan, and P. G. Lawler. 2012. Evaluation of biogas production from anaerobic digestion of pig manure and grass silage. PhD thesis in National University of Ireland.
29. Zhang, R., and Z. Zhang. 1999. Bio gasification of rice straw with an anaerobic phased solids digester system. Bio-resource Technology 68: 235-245.
30. Zhu, B., P. Zhang, R. J. Lord, B. Jenkins, and X. Li. 2009. Characteristics and biogas production potential of municipal solid waste pretreated with a rotary drum reactor. Bio resource Technology 100: 1122-1129.
31. Zwietering, M. H., I. Jongernburger, F. M. Rombouts, and K. Vants Riet. 1990. Modeling of the bacteria growth cruve. Applied and Environmental Microbiology 56: 1875-1881.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 1, Spring - Summer 2018, p. 159-169

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد 8، شماره 1، نیمسال اول 1397، ص 159-169

Modeling of Biogas Production Process from Cow Manure with Completely Stirred Tank Reactor under Semi Continuously Feeding

J. Taghinazhad[1*]- R. Abdi[2]- M. Adl[3]
Received: 25-07-2016
Accepted: 30-11-2016

Introduction

Anaerobic digestion (AD) is a process of breaking down organic matter, such as manure, in the absence of oxygen by concerted action of various groups of anaerobic bacteria. The AD process generates biogas, an important renewable energy source that is composed mostly of methane (CH_4), and carbon dioxide (CO_2) which can be used as an energy source. Biogas originates from biogenic material and is therefore a type of biofuel. Enhancement of biogas production from cattle dung or animal wastes by co-digesting with crop residues like sugarcane stalk, maize stalks, rice straw, cotton stalks, wheat straw, water hyacinth, onion waste and oil palm fronds as well as with liquid waste effluent such as palm oil mill effluent. Nevertheless, the search for cost effective and environmentally friendly methods of enhancing biogas generation (i.e. biogas yield) still needs to be further investigated. Many workers have studied the reaction kinetics of biogas production and developed kinetic models for the anaerobic digestion process. Objective of this study is to investigate the effect of biological additive using of organic loading rate (OLR) in biogas production from cow dung. In addition, cumulative biogas production was simulated using logistic growth model, and modified Gompertz models, respectively.

Material and Methods

The study was performed in 2015-2016 at the agricultural research center of Ardabil Province, Moghan (39.39 °N, 48.88° E). Fresh cow manure used for this research was collected from the research farm of the Institute for Animal Breeding and Animal Husbandry, Moghan. It was kept in 30 l containers at ambient temperature until fed to the reactors. In this study, experiments were conducted to investigate the biogas production from anaerobic digestion of cow manure (CM) with effect of organic loading rate (OLR) at mesophilic temperature (35°C±2) in a long time experiment with completely stirred tank reactor (CSTR) under semi continuously feeding. The complete-mix, pilot-scale digester with working volume of 180 l operated at different organic feeding rates of 2 and 3 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$). the biogas produced was measured daily by water displacement method and its composition was measured by gas chromatograph. Total solids (TS), volatile solids (VS), pH and etc. were determined according to the APHA Standard Methods. The biogas production kinetics for the description and evaluation of methanogens was carried out by fitting the experimental data of biogas production to various kinetic equations. In addition, Specific cumulative biogas production was simulated using logistic kinetic model exponential Rise to Maximum and modified Gompertz kinetic model.

Results and Discussion

The experimental protocol was defined to examine the effect of the change in the organic loading rate on the efficiency of biogas production and to report on its steady-state performance. The biogas produced had methane composition of 58- 62% and biogas production efficiency 0.204 and 0.242 m^3 biogas (kg VS input) for 2 and 3 kg VS.($m^{-3}.d^{-1}$), respectively. The reactor showed stable performance with VS reduction of around 64 and 53% during loading rate of 2 and 3 kg VS.($m^{-3}.d^{-1}$), respectively. Other studies showed similar results. Modified Gompertz and logistic plot equation was employed to model the biogas production at different organic feeding rates. The equation gave a good approximation of the biogas yield potential (P) and correlation coefficient (R^2) over 0.99.

Conclusions

The performance of anaerobic digestion of cow dung for biogas production using a completely stirred tank reactor was successfully examined with two different organic loading rate (OLR) under semi continuously

---

1 and 2- Ph.D. Candidate student and Associate Professor, Biosystems Engineering, Agricultural Faculty, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- Assistant Professor, Institute of Materials and Energy, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: J.Taghinazhad@yahoo.com)

feeding regime in mesophilic temperature range at (35°C±2). The methane content of 58- 62% and actual biogas yield of 0.204 and 0.242 m^3 biogas.(kg VS $input^{-1}$) were observed for 2 and 3 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$), respectively. The modeling results suggested Modified Gompertz plot and Logistic growth plot both had higher correlation for simulating cumulative biogas production. Therefore, arising from the increasing environmental concern and prevailing wastes management crises, optimizing biogas production by 2 kg VS. ($m^{-3}.d^{-1}$) represents a viable and sustainable energy option.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Cow manure, Modeling, Semi continuously reactor